
Prédiction du coefficient de pression interstitielle B : Etat de l'art

Assia Bendi-Ouis*, **Nabil Abou-Bekr***, **Said Taibi****, **Jean-Marie Fleureau*****

* *Laboratoire Eau et Ouvrages dans Leur Environnement, Université A. Belkaid, BP 230 - 13000 Tlemcen, Algérie.*
asbendiouis@gmail.com , aboubekrnabil@yahoo.fr

** *Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, FRE CNRS 1302, Université du Havre, 53 rue de Prony, 76600 Le Havre, France.*
Said.Taibi@univ-lehavre.fr

****Laboratoire de Mécanique des sols, structures & matériaux, Ecole Centrale Paris & CNRS UMR 8579, Grande voie des vignes, 92295 Châtenay-Malabry, France.*
jean-marie.fleureau@ecp.fr

RÉSUMÉ. *L'analyse du comportement des noyaux de barrages en terre compactée requiert la connaissance de l'évolution des pressions interstitielles sous l'effet des cycles de chargement déchargement.*

La prédiction de ces chemins est une nécessité pratique. Dans cet article, on envisage de dresser un état de l'art des approches théoriques de prédiction du coefficient B de Skempton en conduisant une analyse et des comparaisons entre les différentes approches.

ABSTRACT. *The analysis of the behavior of compacted earth dam cores, requires knowledge of the evolution of pore pressure as a result of cycles of loading and unloading.*

The prediction of these paths is a practical necessity. This paper presents a state of the art of theoretical prediction of the Skempton B parameter in leading analysis and comparisons between different approaches

MOTS-CLÉS : *Pression interstitielle, coefficient B, modèles théoriques, état de l'art*

KEYWORDS: *Pore pressure, B coefficient, theoretical models, state of the art.*

1. Introduction

L'augmentation progressive de la contrainte totale lors de la construction de hauts remblais ou de barrages en sols fins peut provoquer, l'apparition de pressions interstitielles importantes. Ces pressions interstitielles présentent une importance capitale dans la stabilité à court terme de ces ouvrages.

Dans les études de barrage, des essais de compression isotrope non saturés au triaxial sont réalisés pour estimer les pressions interstitielles se développant lors de la construction de barrages en sols fins de grande hauteur. Ces essais sont rares et longs à réaliser, le temps d'un essai peut durer plusieurs semaines voire plusieurs mois.

Afin de réduire ce temps et d'estimer au mieux la variation de la pression interstitielle en fonction de la pression isotrope et par conséquent la variation du coefficient de pression interstitielle B , un recensement des différentes analyses formulées par leurs auteurs a été dressé.

2. Travaux de Hilf (1948)

Hilf (1948) a établi une procédure à partir des résultats d'essais œdométriques. Elle permet de prédire le développement de la pression d'air dans les remblais compactés non saturés sous l'effet de variation de contrainte verticale en condition non drainé. Ceci est exprimé sous forme d'une équation de paramètres de pressions interstitielles. Cette méthode est connue sous le nom de la méthode U.S.B.R (United States Bureau of Reclamation). La même analyse a été proposée aussi par Bishop (1957).

L'approche de Hilf est basée sur les hypothèses suivantes:

- Les grains solides et l'eau sont incompressibles.
- La réduction du volume est le résultat de la compression de l'air libre et de l'air dissous dans l'eau.
- La quantité de l'air dissous dans l'eau est calculée avec la loi d'Henry $V_d = H \cdot V_w$ avec ($H=0.02$)
- La variation dans la pression d'air entre les conditions initiales et finales de chargement, est calculée par la loi de Boyle.
- La pression d'air u_a est égale à la pression d'eau u_w
- La pression d'air initiale est considérée comme étant la pression atmosphérique

Le paramètre de pression interstitielle sécant B'_{ah} qui découle de l'analyse de Hilf s'écrit :

$$B'_{ah} = \left[\frac{1}{1 + \frac{(1 - S_0 + h.S_0).n_0}{(u_{a0} + \Delta u_a).m_v}} \right]$$

Avec :

m_v : Coefficient de variation volumique mesuré sur un sol saturé dans un essai œdométrique

S_0, n_0 : Degré de saturation initiale et porosité initiale respectivement.

u_{a0} : Pression d'air atmosphérique = 101.3kPa

Δu_a : Variation de pression d'air

B'_{ah} est supposé égale à B'_{aw}

La figure 1 montre l'évolution de la pression interstitielle pour différents degrés de saturation initiaux en appliquant la méthode de Hilf.

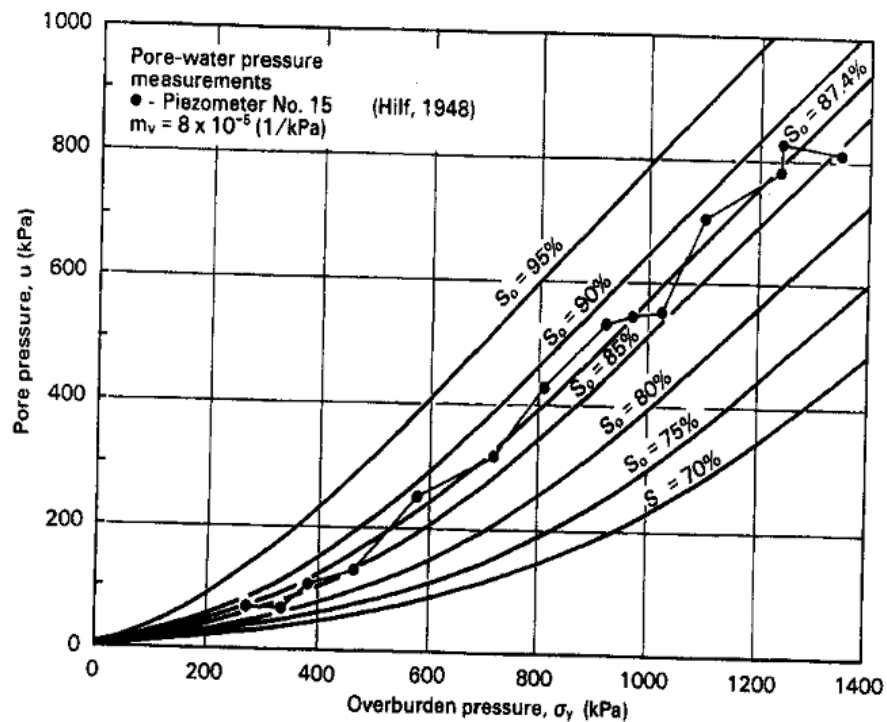


Figure 1 : Variation de la pression interstitielle pour différents degrés de saturation initiaux en utilisant la méthode de Hilf (Fredlund. 1993)

Hilf a fait l'hypothèse que la variation de la pression d'air est supposée égale à la variation de la pression d'eau, cette hypothèse peut être raisonnable pour quelques sols à faible plasticité. Néanmoins, comme la plasticité du sol dans les remblais compactés augmente, la différence entre la pression d'air et d'eau augmente (Fredlund & al. 1999).

En plus qu'en considérant que la pression interstitielle d'eau est prise égale à zéro, ceci conduit lors des calculs à une surestimation des pressions interstitielles.

3. Travaux de Skempton (1954)

Il donne l'expression du coefficient B en fonction de la compressibilité du fluide interstitiel. Dans les sols saturés B approche l'unité et diminue avec la diminution du degré de saturation.

$$B = \Delta u / \Delta \sigma_3 \quad B = \frac{1}{1 + n \cdot \frac{C_v}{C_s}}$$

Avec : Δu variation de pression interstitielle

$\Delta \sigma_3$ Variation de contrainte isotrope

n porosité

C_v coefficient de compressibilité du fluide interstitiel (eau+air)

C_s coefficient de compressibilité du squelette

D'après cet auteur, ce coefficient B varie entre 0,1 et 0,5 pour des sols compactés à l'optimum Proctor. Cette approche ne donne pas d'outil théorique pour prévoir la variation de pression interstitielle ou B en fonction du degré de saturation dans le cas des sols non saturés.

4. Travaux de Hasan & Fredlund (1980)

Les paramètres de pressions interstitielles tangents B d'eau et d'air, peuvent être prédits en utilisant les équations suivantes :

$$B_a = \frac{R_2 \cdot R_3 - R_4}{1 - R_1 \cdot R_3} \quad \text{et} \quad B_w = \frac{R_2 - R_1 \cdot R_4}{1 - R_1 \cdot R_3}$$

Ces équations sont fonction de 4 paramètres R_1 , R_2 , R_3 et R_4 coefficients dépendant des coefficients de variation volumique déterminés par le principe des variables indépendantes, ce qui fait que ces coefficients sont difficiles à déterminer.

La figure suivante montre les résultats de simulations réalisées par cette méthode.

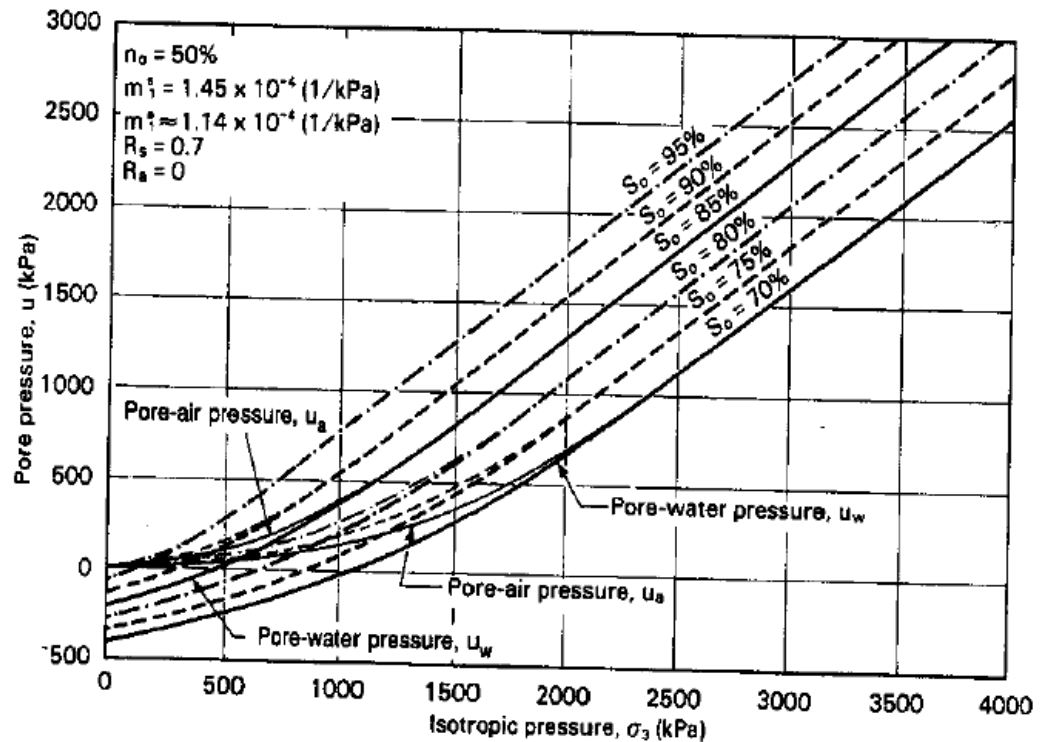


Figure 2 : Effet du degré de saturation initial sur les pressions interstitielles d'air et d'eau en fonction des pressions isotropes (Fredlund, 1993).

5. Travaux de Poulain (1995)

Il propose une amélioration de la théorie de Hilf en reliant la pression d'air u_a à la pression u_w par la relation $u_w = u_a + 2 \cdot q/r$, r étant le rayon des bulles d'air. Cette approche revient en fait à utiliser le coefficient de compressibilité du fluide interstitiel de Schuurmann (1966) qui semble peu réaliste compte tenu des résultats de Murray (2002) et Vaughan (2003) qui montrent que les petites bulles ont tendance à disparaître pour former des bulles plus grosses.

Dans les sols quasi-saturés, Murray (2002) et Vaughan (2003) montrent que les petites bulles ont tendance à disparaître au profit des grandes bulles par des phéno-

mènes de diffusion locale de l'air dans l'eau. Les bulles d'air ont donc tendance à occuper les pores les plus importants.

Ce point semble confirmé par les observations expérimentales. Ainsi, dans le limon de Jossigny compacté à l'optimum Proctor, Delage et Cui (2000) observent que seuls les macropores les plus grands (diamètre de 60 µm) sont pleins d'air. Néanmoins, le diamètre moyen des pores n'est pas nécessairement directement relié à la succion (Sills et al., 1991 ; Vaughan, 2003).

6. Travaux d'Oostveen (2003)

En tenant compte de la compressibilité de la masse solide et du mélange air-eau à l'intérieur des pores, une relation théorique a été développée par Oostveen pour le calcul de B et Sr. Les calculs donnent des résultats similaires aux résultats trouvés dans la littérature. Mais ceci reste à vérifier par des essais de laboratoire.

Le degré de saturation, s'écrit :

$$Sr > \frac{(1+h) \cdot [1 + \alpha_s \cdot (P_{atm} + u_w) \cdot \beta_{solid}]}{h \cdot (1 - \chi) + 1 + \alpha_s \cdot (P_{atm} + u_{water}) \cdot \beta_{water}}$$

Le coefficient B est donné par:

$$B = \frac{1}{1 + \frac{1}{\alpha_n} \cdot \left\{ \frac{Sr}{1+h} \cdot \beta_{water} - \left[(1-Sr) + \frac{\chi \cdot h \cdot Sr}{(1+h)} \right] \right\}}$$

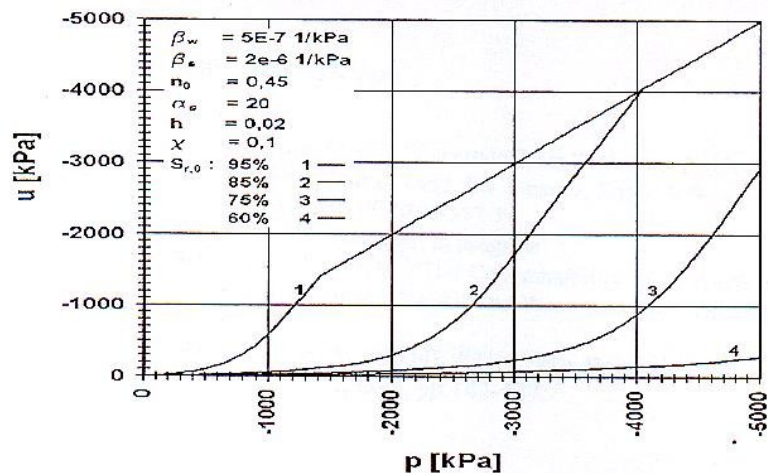


Figure 3 : Relation u-p lors d'un chargement isotrope pour différents degrés de saturation initiaux (Oostveen, 2003)

7. Travaux de Boutonnier (2007)

Boutonnier a défini plusieurs domaines de saturation, selon l'état de l'air dans le sol. Il a différencié le comportement entre le domaine désaturé (phase air continue) et le domaine quasi saturé (air occlus). Donc plusieurs domaines de saturation sont définis :

- Domaine D1 : $s \geq s_{\text{air}}$ et $S_r \leq S_{r_{\text{air}}}$.

Ce domaine est caractérisé par une phase gazeuse continue. Pour les sols argileux la succion d'entrée d'air s_{air} peut s'étendre de quelques dizaines de kpa à plus de 1000 kpa, selon la plasticité du sol argileux (Fleureau et al. 2002).

Le degré de saturation $S_{r_{\text{air}}}$ varie entre 75% et 90 % pour les sols compactés à l'optimum Proctor ou côté humide.

- Domaine D2 : $s \leq s_{\text{air}}$ et $S_{r_{\text{air}}} \leq S_r \leq S_{r_e}$

L'air est occlus dans le sol. Les bulles d'air sont en contact avec les grains solides et la succion s a pour effet d'augmenter les forces de contact intergranulaire. Boutonnier a fixé S_{r_e} comme étant le degré de saturation pour lequel la succion mesurée est nulle.

Dans ce domaine, la perméabilité à l'air est nulle (la phase air n'est pas continue). Ce domaine couvre l'optimum proctor et une partie du côté humide de l'OPN.

- Domaine D3 : $Sr_e < Sr < 1, u_w > u_{we}$

L'air est occlus ($s=0$) ce qui conduit à supposer que $u_a=u_w$.

Dans les sols compactés, le domaine D3 couvre une partie du côté humide de l'OPN (Barden, 1974).

- Domaine D4 : $s=0$ et $Sr=1$

Sol parfaitement saturé.

La limite entre le domaine D3 et D4 peut également s'exprimer à travers la pression interstitielle u_{wsat} correspond à la contre pression qu'il est nécessaire d'appliquer pour saturer un échantillon à l'appareil triaxial.

Les limites entre les différents domaines sont représentées schématiquement pour les sols compactés sur la figure ci-après.

- Domaine D1 : côté sec de la ligne optimale de compactage : phase air continue ;
- Domaine D2 : ligne optimale de compactage et une partie du côté humide ;
- Domaine D3 : côté humide proche de la ligne de saturation ;
- Domaine D4 : ligne de saturation (jamais atteinte lors de la mise en oeuvre du matériau).

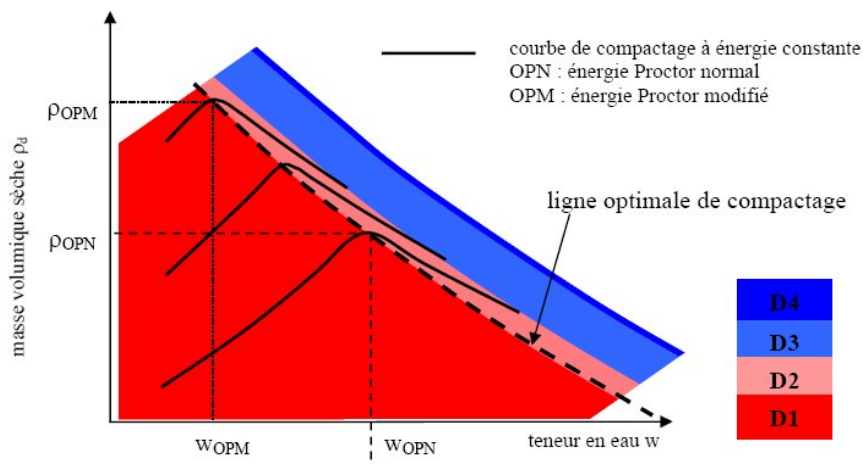


Figure. 4 - Limites des domaines D1, D2, D3 & D4 sur la courbe Proctor (Boutonnier, 2007)

Boutonnier s'est basé sur les hypothèses de calcul suivantes :

- Le rapport masse d'air sur masse d'eau est constant.
- Application de la loi d'Henry $V_d = H \cdot V_w$
- La loi des gaz parfaits.
- L'eau est incompressible comparativement à l'air qui est compressible.

Pour déterminer le coefficient B sécant, l'auteur a développé son analyse sur la base de paramètres faciles à déterminer par des essais courants tels que la limite de liquidité, limite de plasticité et teneur en eau. Ainsi que l'utilisation des corrélations pour la détermination de paramètres plus difficiles à mesurer tel que la succion initiale dans un sol compacté.

Le coefficient B peut ainsi être estimé sur la base de la limite de liquidité w_L et de l'écart de teneur en eau par rapport à la teneur en eau de l'optimum Proctor w_{opt} .

$$u_w(\Delta w_{opt}, w_L) = -0.118 w_L^{1.98} 10^{\frac{-\Delta w_{opt}}{0.54 + 0.03 w_L - (3.3 \cdot 10^{-6}) w_L^2}}$$

$$e_{in_i} = e_{opt}(w_L) + \kappa \ln(10) \frac{\Delta w_{opt}}{0.54 + 0.030 w_L - (3.3 \cdot 10^{-6}) w_L^2}$$

Ainsi pour un chargement isotrope non drainé et pour chaque domaine, une expression de B tangent est définie :

$$B = \frac{1}{1 + \frac{e}{1+e} E'_{iso} \left(\frac{1}{S_r} \frac{dS_r}{du_w} + c_w \right)} \quad \text{si } u_{wair} < u_w < 0 \quad (\text{domaine D2})$$

$$B = \frac{1}{1 + \frac{e}{1+e} c_f E'_{iso}} \quad \text{si } 0 \leq u_w < u_{wsat} \quad (\text{domaine D3})$$

$$B = \frac{1}{1 + \frac{e}{1+e} c_w E'_{iso}} \quad \text{si } u_{wsat} \leq u_w \quad (\text{domaine D4})$$

Avec :

E' iso module effectif isotrope ; dans le cas du modèle Cam-Clay modifié

S_r degré de saturation fonction de u_w et e .

c_w : coefficient de compressibilité de l'eau.

c_f : coefficient de compressibilité du fluide.

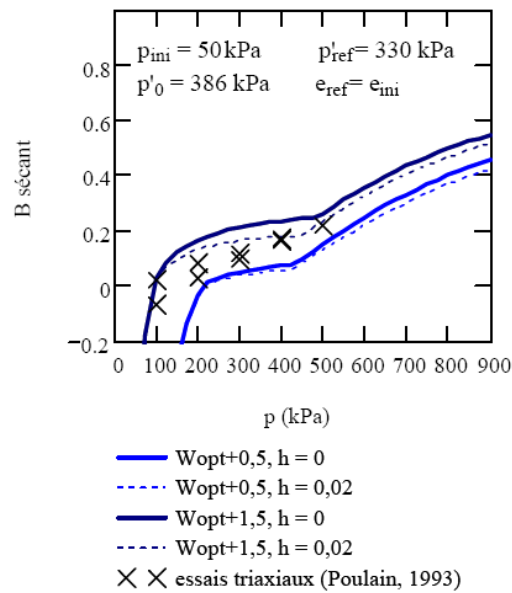


Figure 5- Application du modèle sur le matériau de la Ganne , $w_l=44\%$, $w_p=20\%$ (Boutonnier, 2007)

D'après la figure 5, il est globalement possible d'obtenir un calage correct entre les mesures et le modèle, avec un nombre de paramètres réduit grâce aux corrélations.

8. Conclusion

En comparant les différentes approches citées dans cet article on peut énumérer les constatations suivantes :

- Le modèle de Hilf est simple dans son application, mais il ne tient pas compte de la succion.
- Le modèle de Hansan et Fredlund est complexe car il nécessite plusieurs paramètres en travaillant en variables indépendantes.
- Le modèle d'Oostveen, lui aussi nécessite plusieurs paramètres ce qui ne permet pas de déterminer le coefficient B facilement.
- En ce qui concerne le modèle de Boutonnier, l'idée de formuler une expression de B pour chaque domaine suivant l'état du sol et l'utilisation de corrélations rend le modèle facilement utilisable par les ingénieurs praticiens.

Finalement la prédiction du coefficient de pression interstitielle reste sujette à débat, vu qu'aucune approche n'a donné entière satisfaction.

Références

- Abou-Bekr.N, 1995. Modélisation du comportement mécanique et hydraulique des sols partiellement saturée. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Paris.
- Atkinson J. 2007, The mechanics of soils and foundations, second edition, Francis & Taylor editions.
- Boutonnier L. 2007 Comportement hydromécanique des sols fins proches de la saturation cas des ouvrages en terre : coefficient B, déformations instantanées et différées, retrait / gonflement, Thèse de Doctorat INP Grenoble, France.
- Boutonnier, L. (2005). Tassements et gonflements différés dans les sols fins proches de la saturation. Revue Française de Géotechnique, n°111, p.17-32.
- Coussy O. & Fleureau J.M., 2002: Mécanique des sols non saturés. EditionsLavoisier, Hermès, France.
- D.G. Fredlund, H. Rahardjo & T. Ng. (1999) Effect of pore-air and negative pore-water pressures on stability at the end-of construction from the Proceedings, International Conference on Dam Engineering, Johor Bahru, Malaysia, January 12–13, 1993. pp. 43–51 in The emergence of unsaturated soil mechanics, Fredlund volume; NRC RESEARCH PRESS
- Delage P. & Cui Y.J., 2000: Comportement mécanique des sols non in Techniques de l'Ingénieur, traité Construction C302.
- Fredlund, D.G., Rahardjo, H. (1993). Soil Mechanics for unsaturated soils. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons.
- Hasan, J.U. and Fredlund, D.G. (1980). Pore pressure parameters for unsaturated soils. Canadian Geotechnical Journal, Vol.17, p. 395-404.

- LeBihan, J.-P., Leroueil, S. (2002). A model for gas and water flow through the core of earth dam. *Canadian Geotechnical Journal* Vol.39, p. 90-102.
- Lins, A.H.P., Sandroni, S.S., Sills G.C. (1995). An experimental analysis of the development of pore-water pressure in an unsaturated compacted soil. *Proceedings of the 1st Conference on Unsaturated Soils, Unsat' 95, Paris, vol. 2, p. 759-764.*
- Modaressi, A., Fry, J.-J. (2002). Barrages et remblais. *Mécanique des sols non saturés, sous la direction de O. Coussy et J.M. Fleureau, Lavoisier, Hermes Science, p. 275-348.*
- Oostveen, J.P, 2003 : Undrained isotropic compression of soil in *Proceedings of the international conference « from experimental evidence towards numerical modeling of unsaturated soils », Weimar, Germany, september 18-19, 2003, Springer editions.*
- Poulain D. (1993). Pressions interstitielles de construction dans les barrages homogènes en matériaux argileux humides. *Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I, 199 p.*
- Schuurman Ir. E., (1966). The compressibility of an air/water mixture and a theoretical relation between the air and water pressures. *Géotechnique, vol. 16, p. 269-281.*
- Taibi S., 1994: Comportement mécanique et hydraulique des sols soumis à une pression interstitielle négative – Etude expérimentale et modélisation- *Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Paris, France.*
- Vaughan, P.R. (2003). Observations on the behaviour of clay fill containing occluded air bubbles. *Géotechnique, vol. 53, n°2, p. 265-272.*

8. Remerciements

Le présent travail a été réalisé dans le cadre du projet PAI CMEP TASSILI (réf. 06/MDU/690) entre l'Université A. Belkaid, Tlemcen et l'Université du Havre.